

太陽電地の数理解析

著者	草野 清信, 小泉 智裕
雑誌名	宮城教育大学紀要
巻	50
ページ	199-213
発行年	2016-01-29
URL	http://id.nii.ac.jp/1138/00000483/



太陽電池の数理解析

*草野 清信 ・ **小泉 智裕

Mathematical analysis of the solar cell

KUSANO Kiyonobu and KOIZUMI Tomohiro

Abstract

In this paper, the theory of the solar cell is being reconfigured to conform to the MPPT control scheme. For this purpose, by introducing practical equivalent circuit including a "diode", which is newly proposed, the procedure of graphical methods have been rewritten to suit the computer calculations.

When connecting the two solar cells in series, in the range of smaller value than a certain load resistance, it has been revealed that a solar cell having smaller short-circuit current becomes the load of the other solar cell. Furthermore, when connecting the two solar cells in parallel, in the range of larger value than a certain load resistance, it has been made clear that a solar cell with a smaller short-circuit current becomes the load of the other solar cell.

Key words : Solar cell (太陽電池)

Mathematical analysis (数理解析)

Newly proposed solar cell "diode"

(新しく提案された太陽電池「ダイオード」)

Practical equivalent circuit (実用的等価回路)

Maximum power point tracking (MPPT) (最大電力点追従)

1. はじめに

太陽電池は1954年にベル研究所のピアソンらによって発明された¹⁾。急速な普及が期待されたが、高価であったため、人工衛星、航路標識ブイや灯台用電源など競争相手がいない特殊な用途に限定されて採用されていった。そのような中、第一次オイルショック(1973年)と第二次オイルショック(1979年)に端を発したエネルギー危機を契機にして、太陽電池の本格開発が各国で開始された。1975年にはアモルファス太陽電

池が発明され、低価格化の競争が促されることになり、実用化研究が本格化した。

1994年の1kW当たりのシステム価格は200万円であったが²⁾、2014年4月現在35万円/kWであるから、価格は5.7分の1以下となっている。発電コストも1kWh当たり140円(1994)³⁾から29.9円(2014年4月～6月期)に⁴⁾、そして固定買取価格では非住宅用で27円(補助金込2015年7月)⁵⁾へと数分の1となっている。2015年5月現在、商用電灯料金でも1kWh当たり32円のものもあることから⁶⁾、太陽光発電はこれに太刀

* 技術教育講座

** (株)ヤマト運輸 仙台

打ちできるレベルに達している。

太陽光発電の歩んできた道は紆余曲折あり、厳しい道のりであったといえる。それは国の政策や経済環境の変化に翻弄されてきた。1994年に新エネルギー財団が住宅用発電システムの設置に際して補助金を出す制度を開始した。そのお蔭であろうか、1993年には1kW当たりのシステム価格は370万円であったものが、前述のとおり、200万円に激減している²⁾。1997年気候変動枠組条約第3回締約国会議において「京都議定書」が採択されるに及んで、再生可能エネルギー、とりわけ太陽電池の普及と低価格化が促進した。ヨーロッパではドイツが中心となり、太陽光発電の導入を強く図ったので、その生産量も大幅に増加した。そのため、2003年まで太陽光発電大国として君臨していた日本は、2004年以降2015年現在に至るまで、その座をドイツに譲っている。

一方、日本は太陽光発電よりも原子力発電を強力に推し進めた。原子力企業の買収や原発の輸出などが話題となった。それは2011年3月の東日本大震災まで続き、原発ルネサンスなどと形容された。その結果、2008年のリーマンショックなどの影響も加わり、太陽光発電の導入がやや鈍ったが、2009年には廃止されていた補助金復活で持ち直している。

原発推進の流れは2011年の3・11大震災後急速に弱まり、脱原発政策がドイツを中心とするヨーロッパ各国で取られることになった。日本でも、3・11東日本大震災を受けて、2011年8月、衆参両院の全会一致の賛成により、「再生可能エネルギー特別措置法案」が成立した。これに基づいて2012年7月1日より、風力・地熱・小規模水力・バイオマスなどを助成対象に追加し、かつ余剰電力ではなく、全量を買取る「固定価格買取制度(FIT)」が開始された。その効果は大きく、FIT制度開始の2012年7月からわずか2年後の2014年11月には、運転開始量は500万kWから1900万kWに急増している⁷⁾。自然エネルギーの買取実績に占める太陽光発電の割合も急増していた⁸⁾。さらに、事業用発電電力に占める自然エネルギーの割合も、2012年の1.6%から2014年の4.1%に増加している⁹⁾。

その後、原発推進の政権に交代したため、またもや太陽光発電を含めた自然エネルギー推進にブレーキがかかり始めている。この流れを押しとどめるためには太陽光発電の発電単価の一層の低減が必要である。そ

れには太陽電池価格の低減とエネルギー変換効率の向上が求められる。また、時々刻々変動する日照に応じて最適の発電電力を引き出す技術であるMPPT (Maximum power point tracking) 制御の革新が求められている。

筆者は太陽電池の図式解法について既に報告している¹⁰⁾。図式解法ということもあり、MPPT制御¹¹⁾に対応する理論構成になっていない。本論文は、初学者の教育を念頭に置いて、その内容をMPPT制御に対処できる形に書き換えている。

2. 太陽電池の図式解法

2.1 光照射下での太陽電池の電圧・電流特性

一定強度の光照射下での太陽電池の電圧・電流特性を測るための回路は図1に示されている^{12),13)}。電流 I は太陽電池から流出する方向を正とする。電流 I は、電流測定用抵抗 R の端子間電圧 $(V-E)$ をディジタルマルチメータで測定して、 $(V-E)/R$ として計算する。測定結果をグラフに乗せると図2が得られる。電圧 V をゼロとすれば電流 I は I_{sc} の値を取る。この I_{sc} は短絡電流 (Short Circuit Current) と呼ばれる。電圧 V を増加させていくにつれて電流 I は減少してやがてゼロの値を取る。この時の電圧 V_{oc} は開放電圧 (Open Circuit Voltage) と呼ばれている。

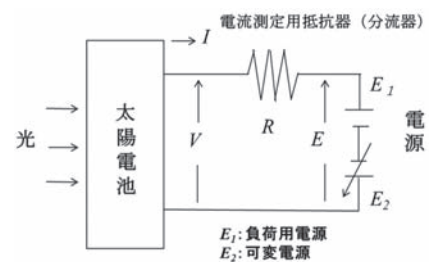


図1 太陽電池の光の照射下の電圧・電流特性を測るための回路

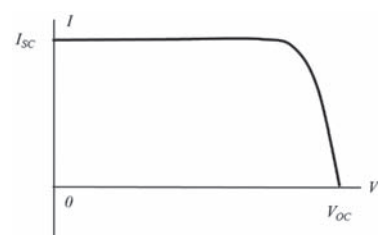


図2 太陽電池の光の照射下での電圧・電流特性

この測定法で不思議に思うことは図1の電源 E_I がなぜ必要かと言うことであろう。この測定法では、電流が太陽電池から流出する範囲では、電源 E_I を負荷(抵抗)として使用しているのである。もちろん、可変抵抗があればそれを用いてもよいのである。その場合、重要な量である I_{sc} と V_{oc} を測るためには抵抗値をそれぞれゼロおよび無限大としなければならない。しかし、それは実現不可能である。可変電圧電源 E_2 と固定電圧電源 E_I (二次電池)を用いて図1のように構成すればそれが実現可能であるので、これを採用している。

2.2 遮光時における太陽電池の電圧・電流特性

遮光時の太陽電池の電圧電流特性を測定する回路は図3に示されている。電流の正の方向は図1の回路のそれとは逆になっている。さて、電源電圧 E を変化させつつ、その都度、端子電圧 V をデジタルマルチメータで測定する。電流 I は、電流測定用抵抗 R を用いて、次式に従って算出する。

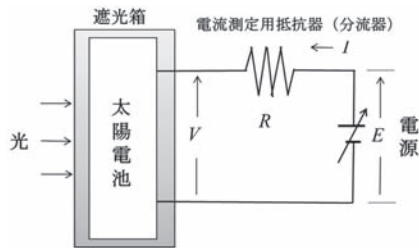


図3 遮光時の太陽電池の電圧・電流特性測定回路

$$I = (E - V) / R \quad (1)$$

これら (V, I) を $V-I$ 図面上に記入すれば、所期の電圧・電流特性($V-I$ 特性)が図4のように得られる。

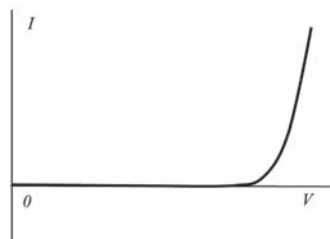


図4 遮光時の太陽電池の電圧・電流特性

2.3 光照射時と遮光時の電圧・電流特性の関係

ここで、光照射時と遮光時の電圧・電流特性の関係

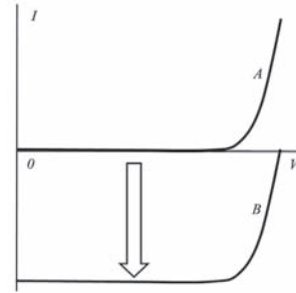


図5 光照射時と遮光時の電圧・電流特性の関係

を明らかにしておく。図2と図4では電流の正の方向が逆になっていることは先に述べたが、図2の特性曲線を図4に書き込むと図5中の曲線Bとなる。曲線Aは遮光時のものである。曲線Bは光の強度に比例して下方に移動していく。

2.4 太陽電池の等価回路

太陽電池の等価回路は図6中の破線で囲まれた回路であることが知られている。

この回路は遮光時には電流源が切り離されるので図7中の破線で囲まれた回路となる。図7にはこの等価回路の電圧・電流特性を測るための外部回路が付属している。この回路全体は遮光時の図3の回路と一致する。そのため、図7中の等価回路の電圧・電流特性は図4に示すそれに一致する。

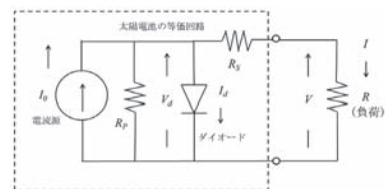


図6 太陽電池の等価回路

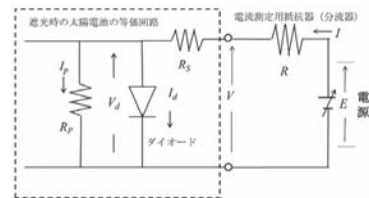


図7 遮光時の太陽電池の等価回路

2.5 太陽電池の実用的な等価回路

太陽電池の計算に困難を引き起こす要因は並列抵抗 R_p と直列抵抗 R_s である。ここで、 R_s を適切に取り込まない不満を残すが、計算を簡便にしてくれる実用的な等価回路として図8のそれを提唱する。その説明を以

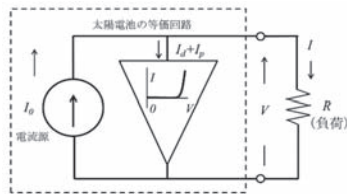


図8 実用的な太陽電池の等価回路

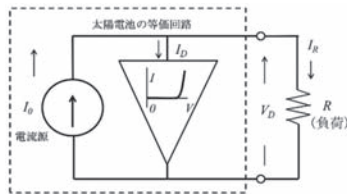


図9 再定義した諸量の記号を配置した等価回路

下に記す。

図4に示す遮光時の等価回路の電圧・電流特性はダイオードのそれによく似ている。そこで、これをダイオードの記号である三角形に包み込んだ記号でその機能を表すことにする。これに太陽光に比例する電流源を並列に接続すれば図8の回路となるが、これは図6に示す太陽電池の等価回路にはほぼ等しくなる。

ここで、以下の議論との整合性を保つために、等価回路中の諸量の記号を図9のように再定義する。なお、図9中の三角形の素子を、以降、誤解のない限り「ダイオード」と呼ぶことにする。

2.6 動作直線、動作点そして出力電力

図9の回路の回路方程式は次のとおりである。

$$\begin{aligned} I_0 &= I_D + I_R, \quad I_R = V_D / R \\ \therefore I_D &= I_0 - V_D / R \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)は、図10に示す V_D - I_D 図面中のA点とB点を結んだ直線で表現できる。この直線を動作直線という。これとダイオードの特性曲線との交点が動作点である。動作点に対応する V_D と I_D の値を、それぞれ、 V_{D0} および I_{D0} とする。太陽電池の実際の出力電圧と出力電流

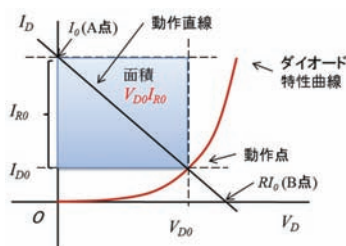


図10 動作直線、動作点および出力電力

は V_{D0} および I_{R0} ($=I_0 - I_{D0}$)である。出力電力は両者の積である面積 $V_{D0}I_{R0}$ ($=V_{D0}(I_0 - I_{D0})$)に一致する。

2.7 最適負荷抵抗

負荷抵抗値を $0(\Omega)$ から増大させると、図10中のB点は原点から V_D 軸を右側に移動する。その結果として、出力電力である面積($V_{D0}I_{R0}$)が変化することが分かる。そして最大出力電力を与える負荷抵抗が1つあることも明らかである。これを「最適負荷抵抗」と呼んでいる。

2.8 図式解法の具体的適用例(まとめ)

図11は、第2.2節で示した方法によって得たPV-MA2120K(三菱電機製)のダイオード特性曲線の実測図である。この図面を使って、短絡電流 $I_0=8(\text{A})$ 、負荷抵抗 $R=4.25(\Omega)$ であるとき、出力電力 P_R がいくらかの値になるかを求めてみる。

図12にその手順が説明されている。A点は I_0 の値で $8(\text{A})$ 、B点は $RI_0=4.25(\Omega) \times 8(\text{A})=34(\text{V})$ である。この2点を結んだものが動作直線である。動作直線とダイオード特性曲線の交点が動作点である。これに対応する値がそれぞれ $V_{D0}=28.8(\text{V})$ 、 $I_{D0}=1.2(\text{A})$ である。出力電流 I_{R0} は $I_0 - I_{D0}$ より $6.8(\text{A})$ となる。出力電力 P_R は $V_{D0} \times I_{R0}$ であるので $195.84(\text{W})$ となる。

図式解法はこのように太陽電池のダイオード特性曲線と動作直線の交点を求めることに尽きる。

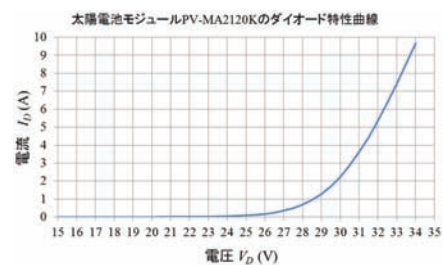


図11 PV-MA2120Kのダイオード特性曲線

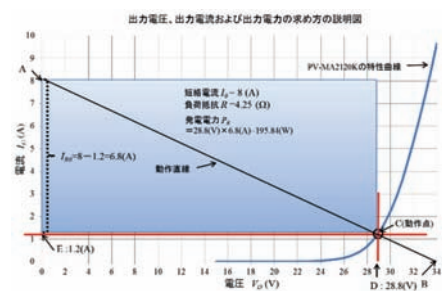


図12 出力電圧、出力電流および出力電力の求め方

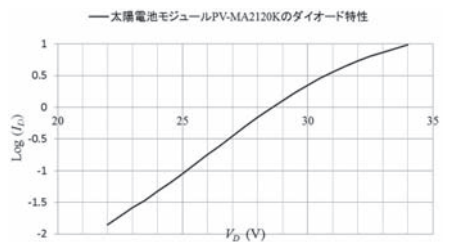
3 太陽電池の数式解法

前節では太陽電池の図式解法の説明を行ったが、手動計算であるため大量の計算が必要な局面には向かない。その場合はどうしても数式解法に頼らざるを得ない。本節ではその説明を行う。

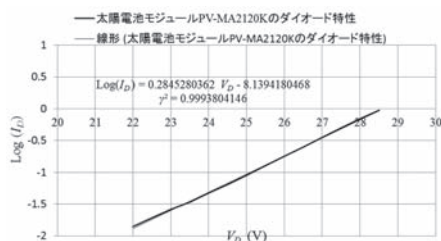
3.1 太陽電池のダイオード特性曲線の数式化

出力電力を計算機で自動計算するにはダイオード特性曲線の数式化は欠かせない。図11はPV-MA2120K（三菱電機製）のダイオード特性曲線の実測図である。

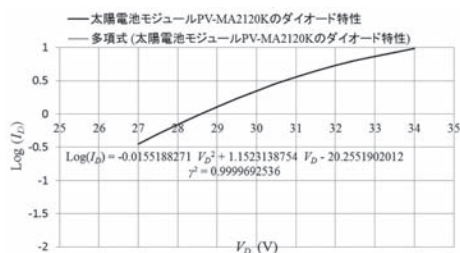
このデータを片対数グラフに乗せると図13(a)が得られる。端子間電圧 V_D が低い領域（図13(b)）では直線近似ができること、高い領域（図13(c)）では二次曲線近似ができること、が分かる。これらの結果を用いると、ダイオード特性曲線 $f_2(V_D)$ の近似式が式(3)と式(4)のように得られる。両式の適用境界値は26.96 (V)である。



(a) 広範囲電圧領域



(b) 低電圧領域



(c) 高電圧領域

図13 片対数図表上のダイオード特性曲線

低電圧領域 (0~26.9598403598752(V))

$$\log I_D = \log f_2(V_D) = 0.2845280362 V_D - 8.1394180468 \quad :$$

$$I_D = f_2(V_D) = 10^{(0.2845280362 V_D - 8.1394180468)} \quad (3)$$

高電圧領域 (26.9598403598752(V)~35(V))

$$\log I_D = \log f_2(V_D) = -0.0155188271 V_D^2 + 1.1523138754 V_D - 20.2551902012$$

$$I_D = f_2(V_D) = 10^{(-0.0155188271 V_D^2 + 1.1523138754 V_D - 20.2551902012)} \quad (4)$$

さて、式(3)と式(4)の信頼性をチェックするために、この式を使った計算値を図11の実測図に乗せてみる。結果は図14である。両者はよく一致していることが分かる。つまり、式(3)と式(4)を用いれば、計算機内で太陽電池の動きをシミュレートできるということである。

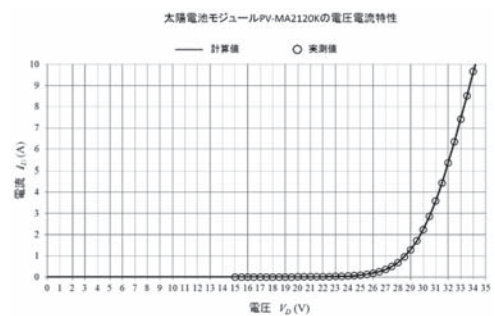


図14 実測値と計算値の比較

3.2 動作点を決定する方法の概要

式(2)の動作直線を $f_1(V_D)$ とする。この $f_1(V_D)$ と特性曲線 $f_2(V_D)$ の交点が、第2.6節で述べたように、動作点である。今、

$$f(V_D) = f_1(V_D) - f_2(V_D) \quad (5)$$

と置く。 $f(V_D)$ は、図15に示すように、動作点の左側では正、そして、右側では負の値をとることが分かる。この事実を利用して動作点の位置を決定する。

図15のように、初期値 V_I と V_S を $f(V_I) > 0$ および $f(V_S) < 0$ となるように設定する。 $V_3 = (V_I + V_S)/2$ とし、 $f(V_3)$ の大きさを計算する。図では $f(V_3) > 0$ であるから、動作点は V_3 と V_S の間とにあることになる。そこで V_3 を改めて V_I と置きなおす。この新 V_I と V_S を初期値として上述の計算を繰り返す。すると、新 V_I と V_S の中点は図15の V_4 になるが、 $f(V_4) < 0$ である。そこで V_4 を新 V_S と置き直

す。動作点は新 V_I と新 V_S の間に存在する。

初期値を2度変更したが、その結果、動作点の存在領域の幅は 2^{-2} ($=1/4$) に狭められたことになる。この手順を踏めば、必要な精度で動作点の位置を決定できる。

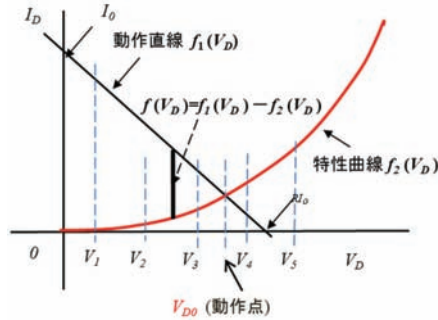


図15 「二分法」による動作点の決定

3.3 電圧電流特性と電圧電力特性

第3.2節で示した手順をプログラミングし、短絡電流 $I_0=8(\text{A})$ と設定する。負荷抵抗 R を様々に変えて、出力電圧 V_D 、出力電流 I_R および出力電力 P_R を得る。その結果の一部が表1である。この表の数値を V_D - I_R および V_D - P_R のペアとしてグラフ化すると、図16が得られる。

この図からは $I_0=8(\text{A})$ のときの開放電圧 V_{OC} は33.24(V)であること、 P_R は $V_D=27.27(\text{V})$ でピークに達してその値は206.59(W)であることが分る。またその

表1 V_D 、 I_R および P_R の R 依存性

$I_0=8(\text{A})$										
$R(\Omega)$	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
$V_D(\text{V})$	7.999999	11.99997	15.99948	19.99116	23.86568	26.87472	28.40149	29.2611	29.82673	30.23504
$P_R(\text{W})$	63.99998	95.99955	127.9917	159.8586	189.8568	206.3573	201.6612	190.2694	177.9267	166.2105
$I_R(\text{A})$	7.999999	7.999981	7.999741	7.996463	7.955225	7.678491	7.100037	6.502467	5.965346	5.497281

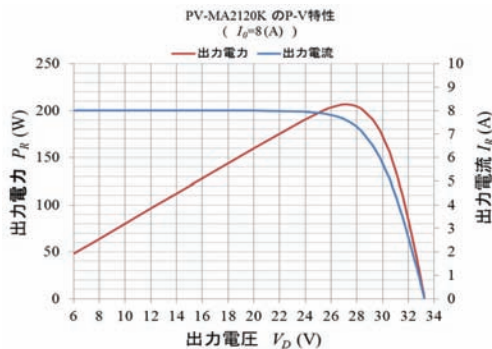
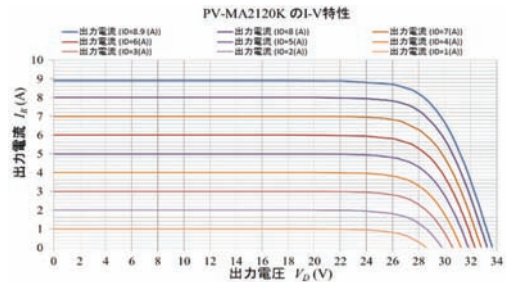


図16 $I_0=8(\text{A})$ に対する I_R - V_D および P_R - V_D 特性図

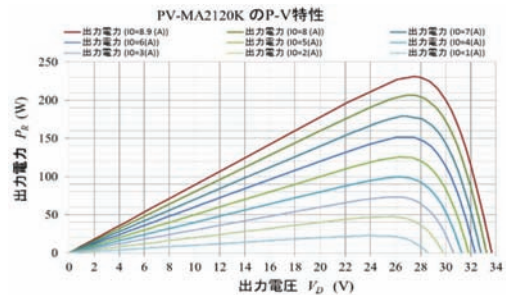
ときの出力電流 I_R と最適負荷抵抗 R_{opt} は、それぞれ、7.575(A)および3.6 (Ω)であることなども同じ計算過程から明らかになる。

大切なことは、第2.7節で述べたように、 P_R には最大値が存在することである。太陽電池は常にこの状態で動作するように、負荷抵抗を最適負荷となるように制御することが望まれる。

なお、 $I_0=8(\text{A})$ 以外での I_R - V_D および P_R - V_D 特性図は図17に掲げている。



(a) I_R - V_D 特性



(b) P_R - V_D 特性

図17 種々の I_0 に対する I_R - V_D および P_R - V_D 特性図

3.4 最適負荷抵抗と最大出力電力の決定

太陽電池から効率よく最大の電力を引き出すことは発電事業にとっては最重要課題である。そのためには最適負荷の大きさを効率よく自動的に導き出すことが求められる。その点では第3.3節で述べた手法はその概数を導くだけであり不十分である。本節では最適負荷抵抗の自動計算の1つの手法を提案する。

最大値を遠く離れていると考えられる領域に R_I と R_S を初期値として設定する。区間 $[R_I, R_S]$ を図18のように4等分して、 R_2, R_3 および R_4 を配置する。これら5つの抵抗値における出力電力を計算して、最大値を与える抵抗 R_X を求める。最適負荷抵抗はこの R_X の両側の抵抗で挟まれた領域に存在する。図18の例でいえば $R_X=R_2$ であるが、それは $[R_I, R_3]$ の範囲に存在する。これ

を改めて $[R_1, R_5]$ として、ここを4等分する。上述の計算を繰り返すと、最適負荷抵抗が存在する領域幅が最初の1/4に狭められる。この手順を繰り返せば、必要な精度で最適負荷抵抗値が決定できる。同時に、この負荷抵抗に対応する電力である最大出力電力も算出できる。

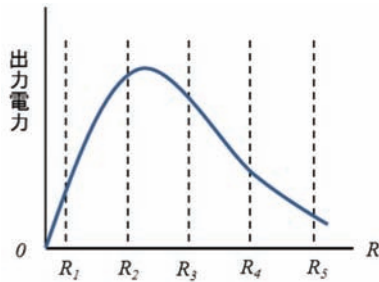


図18 二分法による最適負荷抵抗値の決定法

4. 太陽電池の直列接続

太陽電池は、多数のセルを直列や並列に接続して、所定の特性を満たすように作られている。さらに、太陽光発電施設では、この太陽電池を直列・並列に接続して、性能を確保している。このように、直列・並列接続の問題は太陽電池を取り扱う限り避けて通れない問題となっている。そこで第4節では直列接続を取り上げ、第5節では並列接続を取り扱うことにする。

4.1 ダイオード D_1 とダイオード D_2 の電圧・電流特性が異なる場合

2つの太陽電池が図19のように直列に接続されており、ダイオード D_1 とダイオード D_2 の電圧・電流特性が異なっているとすると、2つの太陽電池の性能の違いや太陽電池表面の日射強度の違いなどを反映して短絡電流（図19中の I_{01} と I_{02} ）が異なってくる。このような

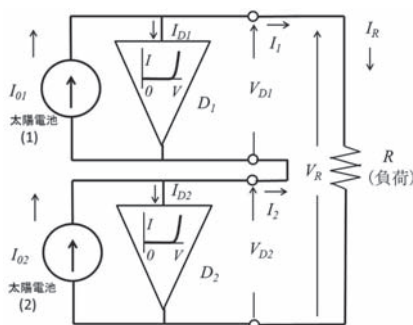


図19 直列に接続された2つの太陽電池

条件下での合成太陽電池の動作を考えることにする。

この問題の関心事は、出力電圧(V_R)と出力電流(I_R)がどのような値に落ち着くかであろう。図19の回路構成を見れば、次の関係が成立することは容易に分かる。

$$I_{01} = I_1 + I_{D1} \quad \therefore \quad I_1 = I_{01} - I_{D1} \quad (6)$$

$$I_{02} = I_2 + I_{D2} \quad \therefore \quad I_2 = I_{02} - I_{D2} \quad (7)$$

$$I_R = I_1 = I_2 \quad (8)$$

$$V_R = RI_R = V_{D1} + V_{D2} \quad (9)$$

式(6)、式(7)および式(8)を式(9)に代入すると、次の2式が得られる。

$$V_{D1} + V_{D2} = R(I_{01} - I_{D1}) \quad (10)$$

$$V_{D1} + V_{D2} = R(I_{02} - I_{D2}) \quad (11)$$

いま、 V_{D1} と V_{D2} の間に次の関係を仮定する。ただし、 α は未知数である。

$$V_{D2} = \alpha V_{D1} \quad (12)$$

式(12)の関係を式(10)および式(11)に代入すると、これらは次のように変形される。

$$I_{D1} = I_{01} - (1 + \alpha)V_{D1}/R \quad (13)$$

$$I_{D2} = I_{02} - ((1 + \alpha)/\alpha)V_{D2}/R \quad (14)$$

式(13)と式(14)をダイオードの電圧・電流特性図上に書き込めば、それらは共に直線となる。この直線を動作直線と呼ばれる。式(13)と式(14)は、それぞれ、 I_D 軸の I_{01} 点および I_{02} 点を、そして、 V_D 軸の $RI_{01}/(1 + \alpha)$ 点および $\alpha RI_{02}/(1 + \alpha)$ 点を通る。ダイオード D_1 の電圧・電流特性曲線と式(13)の動作直線の交点に対応する V_d と I_d の値である V_{D10} と I_{D10} が動作状態におけるそれぞれの値である。また、ダイオード D_2 の電圧・電流特性曲線と式(14)の動作直線の交点に対応する V_D と I_D の値である V_{D20} と I_{D20} が動作状態におけるそれぞれの値である。

実際の動作状態では、出力電流(負荷電流) I_R は、式(8)に示すように、 I_1 と I_2 に一致しなければならない。

$$I_R = I_1 (= I_{01} - I_{D10}) = I_2 (= I_{02} - I_{D20}) \quad (15)$$

この条件を満たす α を決定できれば、問題が解決する。

図20はその手順を示している。ここでは $I_{01} = 10(\text{A})$ 、 $I_{02} = 8(\text{A})$ および $R = 6(\Omega)$ と仮定している。 α が0.5、0.7および0.8に対応する動作直線を書き込んである。これらの結果から、 $\alpha = 0.7$ において式(12)が成り立つことが分かる。このとき、 $I_R (= I_1 = I_2) = 8(\text{A})$ 、および $V_R = V_{D1} + V_{D2} = 28.4 + 19.8 = 48.2(\text{V})$ となる。明らかに次式が成り立つので、検算できたことに

なる。

$$RI_R = 6(\Omega) \times 8(A) = 48(V) \quad (=V_R \div 48.2(V))$$

次に I_{01} を10(A)のままして、 I_{02} を変えたときに諸量の値はどのようになるのだろうか。それを示したのが表2である。 α が負の値となることがあることが分る。これは太陽電池(2)が太陽電池(1)の負荷になっていることを意味する。太陽電池(1)が発生した電力を太陽電池(2)が消費してしまうということなので避けなければならない。その事態を防ぐために図21のように、各太陽電池にバイパスダイオードが並列に接続されている。これによって太陽電池(2)が回路から切り離されるので、エネルギーの損失が避けられる。

表2 特性の揃っていない2つの太陽電池が直列に接続され
たときの合成出力電圧と電流値

$I_{01}=10(A)$	$R=6(\Omega)$						
$I_{02}(A)$	α	$I_{D1}(A)$	$I_{D2}(A)$	$V_{D1}(V)$	$V_{D2}(V)$	$V_R(V)$	$I_R(A)$
10	1.05	0.8	0.8	26.8	28.4	55.2	9.2
9	0.95	1.2	0.2	27.28	25.8	53.08	8.8
8	0.7	2	0	28.4	19.8	48.2	8
6	0.2	4	0	29.8	6	35.8	6
4	-0.22	6	0	30.8	-6.769	24.031	4

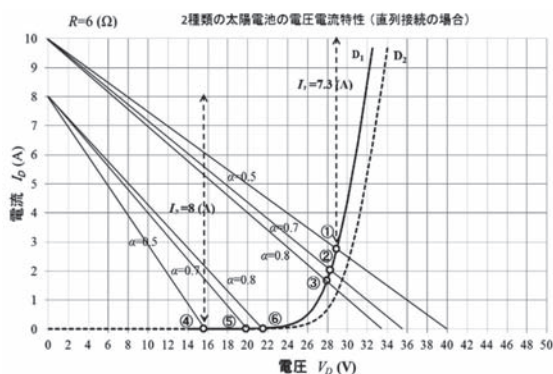


図20 ダイオード D_1 と D_2 の電圧・電流特性が異なる場合の
出力電圧・電流の図式解法

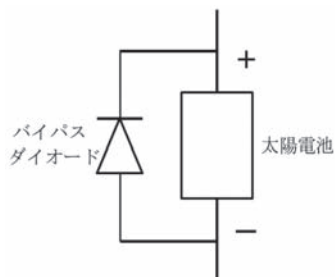


図21 バイパスダイオードを装着した太陽電池

4.2 ダイオード D_1 とダイオード D_2 の電圧・電流特性が同じ場合

太陽光発電では特性がそろっている太陽電池を直列や並列に配列して使用する。特性がそろっていないとエネルギー変換効率が低下するためである。本節では2枚の太陽電池が直列に接続されている場合の特性を明らかにする。

第4-1節で示した計算手順の流れ図として書き表したものが付録Aである。この図を基にして計算プログラムを組む。計算結果を図22～24に示す。計算条件は、太陽電池としてPV-MA2120Kを想定し、 I_{01} は8(A)、そして I_{02} は0.5(A)である。

図22は出力電圧、出力電力、出力電流および α を負荷抵抗の関数と捉えて表示したものである。出力電力は負荷が113.218(Ω)のときピークに達し、その大きさは26.79268(W)である。この113.218(Ω)が最適負荷抵抗となる。このとき、 α は0.667129、出力電圧は55.07643(V)、そして出力電流は0.486464(A)である。最適負荷抵抗以下では出力電力、出力電圧および α はほぼ比例関係にあること、出力電流は一定値(0.5(A))となることも分る。

図23は出力電圧(V_R)の内訳を表している。 V_R は太陽電池(1)と太陽電池(2)の出力電圧である V_{D1} と V_{D2} の和である。 V_{D1} は、負荷抵抗値が90(Ω)までは、一定値33.03054(V)をとる。 V_{D2} は-33.03054(V)から上昇して27.50534(V)に達する。その間、負荷抵抗が66.0611(Ω)のとき、 V_{D2} はゼロとなる。もちろん、このとき V_R は33.03054(V)である。この電圧以下では太陽電池(2)は太陽電池(1)の負荷となる。この電圧では出力電流 I_R が0.5(A)であるから、出力電力 P_R は16.51527($=33.03054 \times 0.5$)(W)となる。 V_R は0(V)から出発して単調に上昇して60.76261(V)に至る。

図24は出力電力、出力電流および α を出力電圧の関数として書き換えたものである。この図面は太陽光発電システムの制御法であるMPPT制御関連の書物で利用されている。

図24での計算条件は $I_{01}=8(A)$ 、 $I_{02}=0.5(A)$ であった。ここでは $I_{01}=8(A)$ は変わらないが、 I_{02} を変化させてみよう。その計算結果が図25である。出力電流は日射強度の小さい方の太陽電池の電流値で制限されることが分かる。この事実は重い。太陽電池(2)の表面が暗黒になったときは、太陽電池(1)で発生したエネルギー

は完全にブロックされて出力することはないからである。太陽電池(1)と(2)が入れ替わった場合も同じであって、太陽電池の表面に影を作ってはならないのである。

なお、太陽電池(2)が太陽電池(1)の負荷に転化する負荷抵抗(R_{TR})とそのときの出力電圧(V_{TR})の大きさが、 I_{02} によってどのように変化するかを計算した結果が表3である。これをグラフ化したものが図26である。この図から、 R_{TR} は、 $I_0=8(A)$ の近傍を除いて、次のように近似計算できることが明らかである。

$$R_{TR} = 32.7341531976 / I_{02}^{1.0475446965} \quad (16)$$

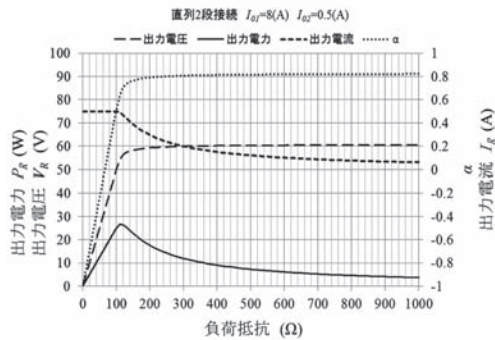


図22 負荷抵抗の関数としての出力電圧・電流・電力

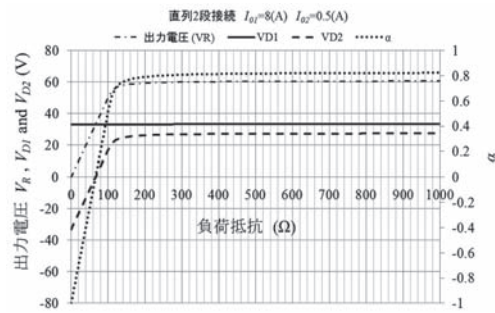


図23 出力電圧(V_R)の内訳

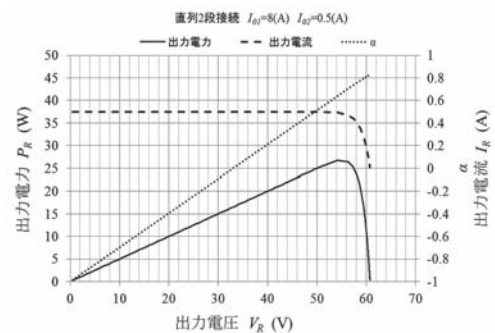


図24 出力電圧の関数としての出力電力・電流

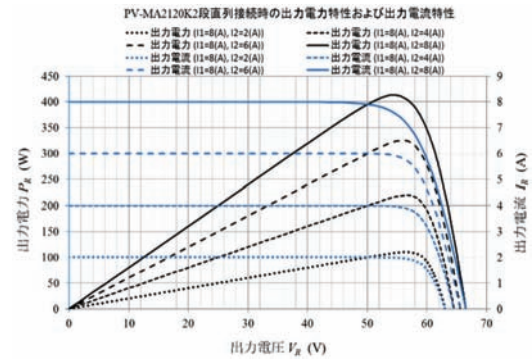


図25 短絡電流(I_{01} , I_{02})が異なる直列太陽電池の出力電力(P_R)および出力電流(I_R)

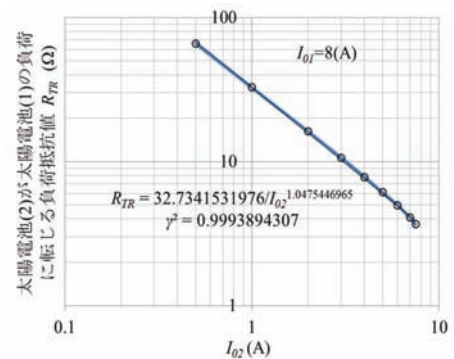


図26 太陽電池(2)が太陽電池(1)の負荷に転化する負荷抵抗値(R_{TR})とそのときの出力電圧値(V_{TR})

表3 太陽電池(2)が太陽電池(1)の負荷に転化する負荷抵抗(R_{TR})とそのときの出力電圧(V_{TR})および出力電力(P_{TR})

$I_{01}=8(A)$									
$I_{02}(A)$	0.5	1	2	3	4	5	6	7	7.5
$R_{TR}(\Omega)$	66.062	32.802	16.165	10.608	7.816	6.123	4.966	4.082	3.668
出力電圧 $V_{TR}(V)$	33.031	32.802	32.328	31.824	31.264	30.615	29.796	28.574	27.51
出力電力 $P_{TR}(W)$	16.516	32.802	64.656	95.472	125.056	153.075	178.776	200.018	206.325

4.3 バイパスダイオードを各太陽電池に並列に接続したときの電力・電流特性

第4-2節で述べた影による発電電力がブロックされる事態を避けるには、図21のバイパスダイオードを装着すればよい。これを接続した状態を等価回路に示したのが図27である。第4-1節での α が負になることに対応するが、発電電力がブロックされる状態では図中の V_{D2} が負の値となっている。このとき、バイパスダイオードが順方向にバイアスされるので、太陽電池(2)によってブロックされる回路電流がこのダイオードを通過するようになる。結果として、太陽電池(1)で発生された電力が負荷側に取り出せることになる。

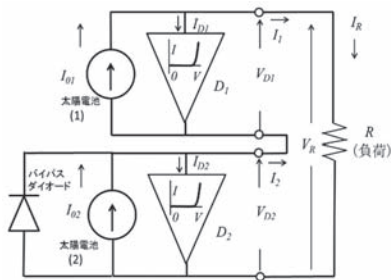


図27 バイパスダイオードを接続した太陽電池

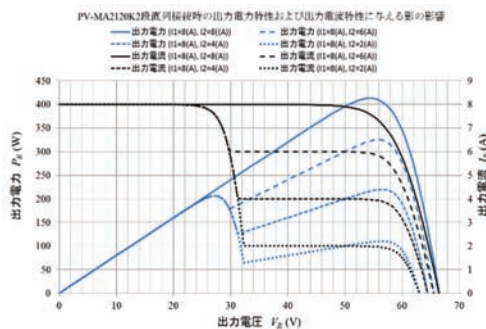


図28 バイパスダイオードを接続した2段直列太陽電池の出力電力・電流特性に与える影の影響

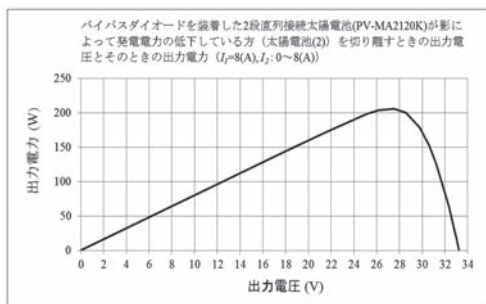
図29 影によって出力電力の低下した太陽電池(2)をバイパスダイオードが回路から切り離すときの出力電圧(V_{TR})とそれときの出力電力(P_{TR})

図28は図25と対をなしている。太陽電池(2)はバイパスダイオードが図27のように並列に接続されている。図28にはこの状態での太陽電池の出力電力と出力電流の大きさが書き込まれている。両者はともに、バイパスダイオードが装着されていないときに比較して、上方に移行している。影によって照射強度が低下してその出力電力が減少している太陽電池(2)をバイパスダイオードによって回路から切り離した効果が現れている。もちろん、バイパスダイオードで消費される電力が生ずるが、ブロックされる電力に比較して小さい。

なお、太陽電池(2)が切り離されるときの出力電圧

とそのときの出力電力を示したものが図29である。出力電力は、図25あるいは図28のように右側上方から下降して、本曲線と交差する。その後、本曲線にそって上昇を始めてピークに達したのち、再度本曲線の上辺に沿って低下するという動きをする。本曲線に交差したのちに上昇した分だけ、出力電力は増加する。

図30は($I_{01}=8(A)$, $I_{02}=3(A)$)に対応する図28の中の特性曲線を負荷抵抗の関数として書き換えたものである。負荷抵抗値が $3.571(\Omega)$ と $19.401(\Omega)$ において出力電力にピーク値を有することが分かる。それらは、それぞれ、 $206.617(W)$ および $165.3215(W)$ であるが、負荷抵抗値が $3.571(\Omega)$ で動作させた方が有利である。MPPT制御はピーク電力を監視して、太陽電池からの出力電力を常に大きくなるように制御している¹¹⁾。

表3の数値群を連ねると図29の曲線が出来上がることも付け加えておく。

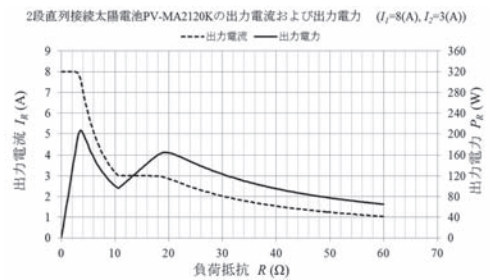


図30 負荷抵抗の関数としての出力電流及び出力電力

5. 太陽電池の並列接続

5.1 ダイオード D_1 とダイオード D_2 の電圧・電流特性が異なる場合(手動計算)

2つの太陽電池が図31のように並列に接続されており、しかもダイオード D_1 とダイオード D_2 の電圧・電流特性が異なる場合の動作を考える。この問題の最大に関心事は出力電圧 V_R と出力電流 I_R はいかなる値に落ち着くのかである。それを図式的に決定する方法を明らかにする。

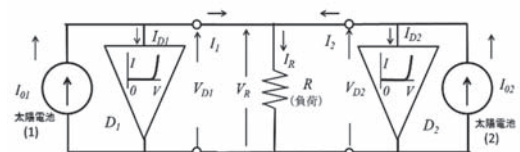


図31 並列接続された2つの太陽電池

図31の回路を見れば、次の3式が成立することは容易に理解できる。

$$I_{01}=I_{D1}+I_1 \quad \therefore I_1=I_{01}-I_{D1} \quad (17)$$

$$I_{02}=I_{D2}+I_2 \quad \therefore I_2=I_{02}-I_{D2} \quad (18)$$

$$V_{D1}=V_{D2}=V_R=R(I_1+I_2) \quad (19)$$

式(17)と式(18)を式(19)に代入すると、次の2式が得られる。

$$I_{D1}+I_{D2}=(I_{01}+I_{02})-V_{D1}/R \quad (20)$$

$$I_{D1}+I_{D2}=(I_{01}+I_{02})-V_{D2}/R \quad (21)$$

いま、 I_{D2} と I_{D1} が次の関係を有すると仮定する。

$$I_{D2}=\alpha I_{D1} \quad (22)$$

式(22)の関係を式(20)と式(21)に代入すると、

$$I_{D1}=(1/(1+\alpha))\{(I_{01}+I_{02})-V_{D1}/R\} \quad (23)$$

$$I_{D2}=(\alpha/(1+\alpha))\{(I_{01}+I_{02})-V_{D2}/R\} \quad (24)$$

が得られる。

ダイオードの電圧・電流特性図上に書き込めば、式(23)と式(24)は共に V_D 軸上の $(I_{01}+I_{02})R$ 点を通る直線となる。そして式(24)と式(25)は、それぞれ、 I_D 軸上の $(1/(1+\alpha))(I_{01}+I_{02})$ 点および $\{\alpha/(1+\alpha)\}(I_{01}+I_{02})$ 点を通る。ダイオード D_1 の電圧・電流特性曲線(D_1)と式(23)が示す直線の交点に対応する V_D と I_D の値である V_{D10} と I_{D10} が動作状態のそれぞれの値である。また、ダイオード D_2 の電圧・電流特性曲線(D_2)と式(24)が示す直線の交点に対応する V_D と I_D の値である V_{D20} と I_{D20} が動作状態のそれぞれの値である。

ところで、図31の回路構成を考慮すると、式(19)の関係を満たさなければならない。すなわち、 $V_{D10}=V_{D20}$ でなければならない。この関係は α のある特定の1つの値で満たされる。図32はこのことを図式的に示している。図32では $R=4(\Omega)$ としているが、 $I_{01}=10(\text{A})$ 、 $I_{02}=8(\text{A})$ のとき $\alpha=0.525$ であれば $V_{D10}=V_{D20}$ が成立する。すなわち、

$$V_{D10}=V_{D20}=31.2(\text{V})$$

$$I_{D10}=6.7(\text{A})$$

$$I_{D20}=3.5(\text{A})(=\alpha I_{D10}=0.525 \times 6.7)$$

そして、負荷電流(I_R)は次のようになる。

$$I_R=I_1+I_2=I_{01}+I_{02}-(I_{D10}+I_{D20})$$

$$=18-(6.7+3.5)=7.8(\text{A})$$

明らかに

$$V_{D10}=V_{D20}=V_R=RI_R=4(\Omega) \times 7.8(\text{A})=31.2(\text{V})$$

が成り立つので、相互の数値間には矛盾のないことが分かる。

なお、条件は図32の場合と同じとし、 I_{02} の大きさを变化させたときの出力電圧(V_R)と出力電流(I_R)の大きさを計算した結果を示すのが表4である。図式解法であるので、結果の数値に誤差が混入するのを排除できない。

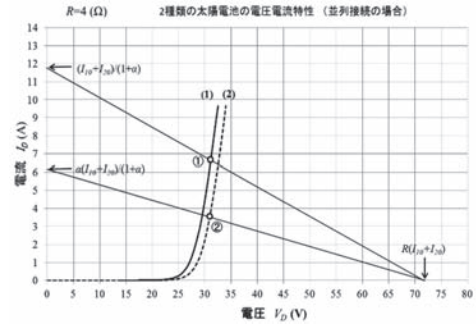


図32 ダイオード D_1 と D_2 の電圧・電流特性が異なる場合の出力電圧・電流の図式解法

表4 特性の揃っていない2つの太陽電池が並列に接続されたときの合成出力電圧と電流値

$I_{01}=10(\text{A})$											
$I_{02}(\text{A})$	α	$I_{D1}(\text{A})$	$I_1(\text{A})$	$I_{D2}(\text{A})$	$I_2(\text{A})$	$V_{D1}(\text{V})$	$V_{D2}(\text{V})$	$V_R(\text{V})$	$I_R(\text{A})$		
9	0.6	6.9	3.1	4.15	4.85	31.4	31.4	31.4	7.95		
8	0.525	6.7	3.3	3.5	4.5	31.2	31.2	31.2	7.8		
6	0.49	5.7	4.3	2.7	3.3	30.5	30.5	30.5	7.6		
4	0.47	4.4	5.6	2.1	1.9	30	30	30	7.5		

5.2 ダイオード D_1 とダイオード D_2 の電圧・電流特性が異なる場合(自動計算)

第5.1節では計算手順の説明の為に手動計算を行ったが、それには計算精度や計算時間に難点がある。そこで、本節ではこの難点を克服する自動計算を導入する。そのためには第3節や第4.2節での知識を活用する。太陽電池としてはPV-MA2120K(1)と仮想太陽電池(2)を想定する。仮想太陽電池のダイオード特性は、図33のように、PV-MA2120Kのそれを0.5(V)だけ正の方向に移動させたものとする。

図34は、太陽電池(1)と(2)の短絡電流である I_{01} と I_{02} を、それぞれ、8(A)および7(A)としたときの、出力電力と出力電流の大きさを示している。出力電力は出力電圧が27.34889(V)のときピークに達する。そのときの値は389.3202(W)である。また、出力電力と出力電流はともに出力電圧が33.27895(V)のときゼロとなる。

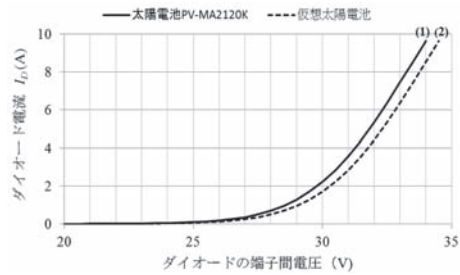


図33 PV-MA2120K(1)と仮想電池(2)のダイオード特性

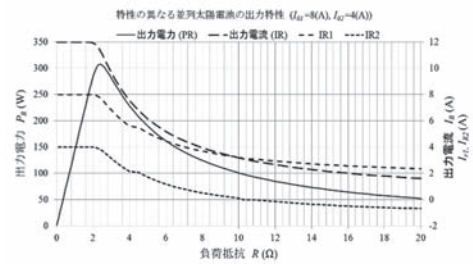
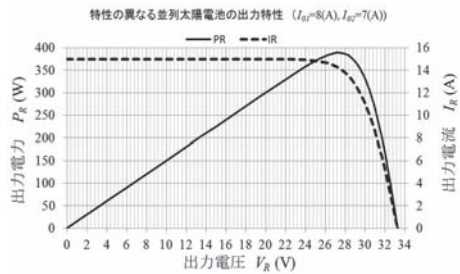
図36 太陽電池(2)の出力電流 I_{R2} が負に移行する様子

図34 出力電圧の関数としての出力電力と出力電流

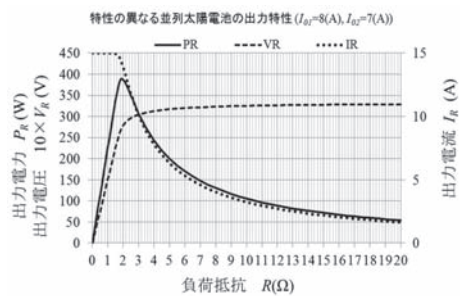


図35 負荷抵抗の関数としての出力電力・電流・電圧

図35は図34を負荷抵抗の関数として書き換えたものである。出力電力は負荷抵抗が $1.9212(\Omega)$ のときピークに達するので、この値が最適負荷抵抗値である。この抵抗値以下のときは、出力電圧は負荷値に比例し、出力電流は $15(A)$ で一定となる。負荷抵抗が $350.3058(\Omega)$ 以上のとき、太陽電池(1)が太陽電池(2)の負荷になる。すなわち、太陽電池(1)の出力電流(I_{R1})が負の値になる。

この現象を負荷抵抗の小さい領域で見するために短絡電流の組み合わせを($I_{01}=8(A)$, $I_{02}=4(A)$)としてみよう。計算結果は図36に書き込まれている。 I_{R2} は負荷抵抗が $10.205(\Omega)$ のときゼロとなり、出力電流と出力電力は、それぞれ、 $3.112566(A)$ および $98.86672(W)$ である。それ以上の負荷抵抗値では I_{R2} は負になっていることが分かる。この点については次節でも取り上げる。

5.3 ダイオード D_1 とダイオード D_2 の電圧・電流特性が同じ場合

発電プラントでは、発電効率向上のため、特性の揃った均質の太陽電池を使用する。そこで、特性の揃った2つの太陽電池が図31のように並列に接続されているとする。ここでは、これらを図37のように分離する。この状態の各太陽電池の動作直線はそれぞれ次のようになる。

$$I_1 = I_{01} - V_{D1}/R_1, \quad I_2 = I_{02} - V_{D2}/R_2 \quad (25)$$

2直線の交点(V_{D0} , I_{D0})は簡単な計算ののち次のように得られる。

$$V_{D0} = R_1 R_2 (I_{01} - I_{02}) / (R_2 - R_1) \\ I_{D0} = (R_2 I_{02} - R_1 I_{01}) / (R_2 - R_1) \quad (26)$$

この交点が図38のように太陽電池の電圧電流特性曲線上に乗ったとしよう。すると同図中の V_{R1} と V_{R2} は一致するので、A点とB点を導線で結ぶことができる。それは図31で示す結線状態に一致する。図31中の R は R_1 と R_2 の並列合成抵抗であるから、式(27)のように表すことができる。

$$R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) \quad (27)$$

それでは R_1 と R_2 はどのようにして計算すればよいのだろうか。図38から次の比例関係が読み取れる。

$$R_1 I_{01} : (R_1 I_{01} - V_{D0}) = I_{01} : I_{D0} \quad (28)$$

これを变形すると、つぎの式が得られる。

$$R_1 = V_{D0} / (I_{01} - I_{D0}) \quad (29)$$

同様にして次の結果も得られる。

$$R_2 = V_{D0} / (I_{02} - I_{D0}) \quad (30)$$

電流に関しては次の知見が得られる。

$$I_1 = I_{R1} = I_{01} - I_{D0} \quad I_2 = I_{R2} = I_{02} - I_{D0} \\ I_R = I_1 + I_2 = I_{01} + I_{02} - 2I_{D0} \quad (31)$$

式(29)、式(30)および式(31)を式(27)に代入すると、負荷抵抗 R がより具体的に次のように表すことができる。

$$R = V_{D0} / (I_{01} + I_{02} - 2I_{D0}) \quad (32)$$

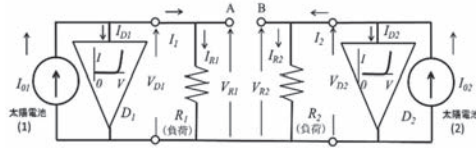


図37 並列接続を解除された2つの太陽電池

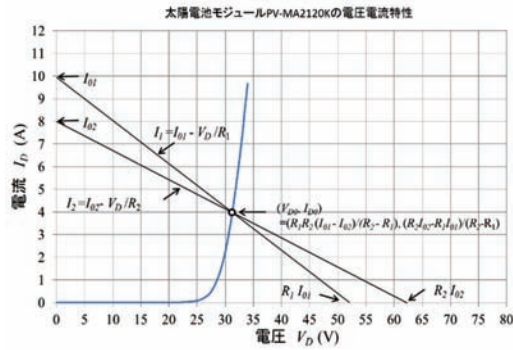


図38 動作直線が電圧電流特性曲線上で交わる状態

出力電力 P_R は次のように計算される。

$$P_R = V_{D0}(I_{01} - I_{D0}) + V_{D0}(I_{02} - I_{D0}) = V_{D0}(I_{01} + I_{02} - 2I_{D0}) \quad (33)$$

太陽電池PV-MA2120Kのダイオードの電圧電流特性が式(3)と式(4)で書き表せることに基いて、出力電流、出力電力および負荷抵抗値を求める簡単な計算プログラムを組む。計算条件を $I_{01}=8(\text{A})$ $I_{02}=0.5(\text{A})$ として、いくつかの計算を行ったが、それらは図39～41に示されている。

図39は出力電力、出力電流および負荷抵抗を出力電圧の関数と捉えてグラフ化したものである。出力電力にはピーク値211.9631(W)があること、そのときの出力電圧と負荷抵抗は、それぞれ、26.38(V)および3.28314(Ω)であることなどが分かる。また、出力電圧は31.41051(V)より高くなることはなく、このとき、出力電力はゼロとなる。なお、3.28314(Ω)は本動作条件での最適負荷抵抗である。

図40は図39の出力電流(I_R)の内訳を表している。それは I_1 と I_2 の和であるが、それぞれ、太陽電池(1)と太陽電池(2)の出力電流である。 I_2 は出力電圧が27.50549(V)のとき、正の値から負の値に転じる。つまり、太陽電池(2)が太陽電池(1)の負荷に転じる。このときの出力電力は206.2913(W)であるが、これはすべて太陽電池(1)に由来している。

図41は図39を負荷抵抗の関数として書き換え、出力電圧を加えたものである。負荷 R が3.667397(Ω)以上で

は I_2 は負になる。つまり、太陽電池(2)は太陽電池(1)の負荷になってしまう。勿論、このときの出力電圧は前述の27.50549(V)である。

直列接続時にも一方の太陽電池が他方のその負荷になることを第4-1節や第4-2節で述べたが、並列接続時にもこのような現象が起こる。

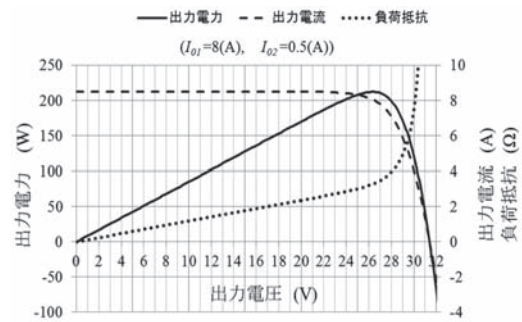


図39 出力電圧の関数としての出力電力と出力電流および負荷抵抗

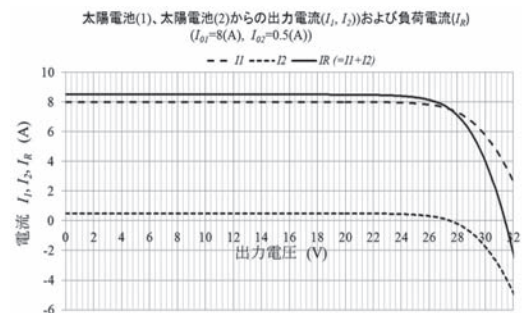


図40 出力電圧の関数としての出力電流(I_1 , I_2 , I_R)

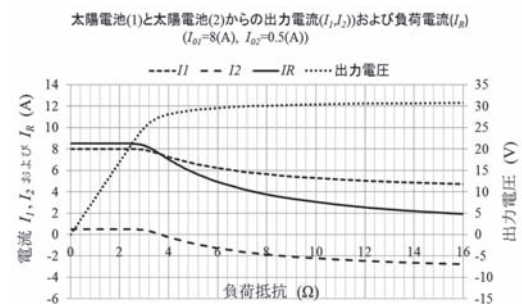


図41 負荷抵抗の関数としての出力電流と出力電圧

6. まとめ

第2節 図式解法

図式解法の基礎となる太陽電池の電圧・電流特性を測定する方法を紹介している。同時に、遮光時の等価回路の電圧電流特性測定法と太陽電池「ダイオード」

の提案を行っている。さらに、実用的な等価回路の提案を行い、その活用法について言及している。

第3節 数式解法

前節の図式解法を自動計算が可能とする数式解法に書き換えるために必要な、ダイオード特性曲線の数式化をまず行っている。そして、(1)動作点を自動的に決定する方法。(2)電圧電流特性と電圧電力特性の導出法、(3)最適負荷抵抗と最大出力電力の導出法などの、説明を行っている。

第4節 太陽電池の直列接続

- (1) ダイオード特性も短絡電流も異なる2つの太陽電池を直列接続したときに期待される、出力電圧、出力電流および出力電力の大きさを、手動で計算する方法を明らかにしている。一方が他方の太陽電池の負荷となることのあることを示した。
- (2) 上記(1)の手動計算を自動計算が可能な計算プログラムに書き換えた。2つのダイオード特性が同一であるという条件をこの計算プログラムに課して、幅広く数値計算を行っている。負荷抵抗(R)が最適負荷抵抗(R_{opt})以下のある大きさまでは、短絡電流の小さい太陽電池(2)の出力電圧が負になること、つまり、太陽電池(2)が短絡電流の大きい太陽電池(1)の負荷になることを明らかにしている。
- (3) 太陽電池(2)にダイオードを逆極性で並列に接続しておけば、出力電圧が負になった瞬間、このダイオード（バイパスダイオード）が順方向バイアスされて導通する。これが電流の通路となるので、太陽電池(2)が回路から切り離される。その結果、太陽電池(1)で発生された電力が無駄なく出力され、発電効率が向上する。その様子を数値計算するプログラムを作成している。

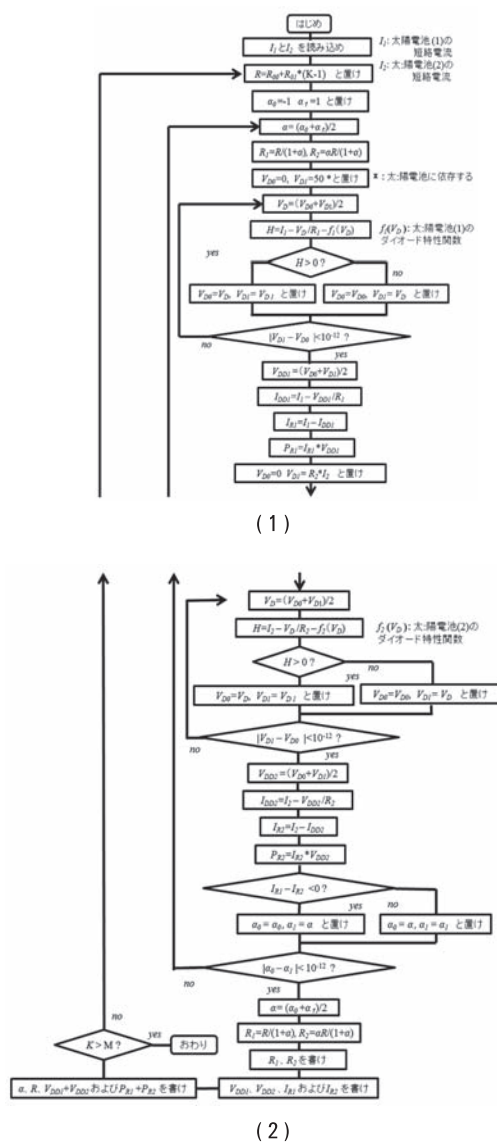
第5節 太陽電池の並列接続

- (1) ダイオード特性も短絡電流も異なる2つの太陽電池を並列接続したときに、期待される出力電圧、出力電流および出力電力の大きさを手動で計算する方法を明らかにしている。
- (2) 上記(1)の手動計算を自動的に計算できる計算プログラムに書き換えている。この計算プログラムを用いて、幅広く数値計算を行っている。負荷抵抗(R)が最適負荷抵抗(R_{opt})以上のある大きさに達すると短絡電流の小さい太陽電池(2)の出力電流が

負の値となること、つまり、太陽電池(2)が太陽電池(1)の負荷になることを明らかにしている。

- (3) ダイオード特性が同一である場合に適する簡易で正確な特性解析法も提示した。

付録A ダイオード D_1 とダイオード D_2 の電圧・電流特性が
同じ場合の計算の流れ図



文献

- 1) D.M. Chapin, C.S. Fuller, and G.L. Pearson, "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power," J. Appl. Phys., vol. 25, pp. 676-677 (1954)
- 2) エネルギー白書2013 第2部 エネルギー動向 第1章 国内

エネルギー動向 第3節 一次エネルギーの動向 (2)再生
可能エネルギー ②太陽光発電

- 3) 「NEDOBOOKS」編集委員会：なぜ、日本は太陽光発電で世界一になれたのか, p.116, 新エネルギー産業技術総合開発機構(2007・3)
- 4) ディスカッション・ペーパー「固定価格買取制度2年の成果と自然エネルギー政策の課題」、自然エネルギー財団(2014年8月)
- 5) 太陽生活ニュース：2015年度の住宅用太陽光発電の買取価格33円/kWhへ, 太陽生活(2015年2月24日)
- 6) 「夜得」プラン、東京電力(2015年)
- 7) 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 長期エネルギー需給見通し小委員会 (第4回 平成27年3月10日(火)) 資料2「再生可能エネルギー各電源の導入の動向について」、資源エネルギー庁(2015)
- 8) 資源エネルギー庁 統計ポータルサイト 再生可能エネルギー C表 買取電力量及び買取金額の推移 (2016/1)
- 9) 自然エネルギー財団 自然エネルギー関連統計 最新・動向 2015年5月22日更新
事業用発電電力に占める割合 2011:1.4%, 2012:1.6%, 2013年:2.5%, 2014:4.1%
- 10) 草野清信：太陽電池の図式解法, 宮城教育大学紀要第39巻, pp.171-183 (2004)
- 11) 板子一隆：太陽光発電システムのパワーコンディショナー入門, オーム社(2014)
- 12) 日本規格協会：「結晶系太陽電池セル出力測定方法 JIS C8913」(1989)
- 13) 日本規格協会：「結晶系太陽電池モジュール出力測定方法 JIS C8914」(1989)

(平成27年9月30日受理)